

性能与排放

基于响应面近似模型的双层喷孔参数优化研究

龚鑫瑞, 刘振明, 黄新源, 刘楠

(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

摘要: 在共轨柴油机上采用双层交错布置喷孔油嘴可以改善柴油机的经济性和排放性能。针对双层交错布置喷孔油嘴与燃烧室优化匹配问题, 采用 CFD 软件, 运用中心组合试验设计方法设计燃油系统参数的试验计算矩阵并进行数值计算; 再以响应面近似模型构造燃烧和排放的优化目标函数; 最后运用多岛遗传算法对该近似模型进行全局寻优, 确定燃油系统参数的优化组合, 并在试验台架上进行了优化方案的配机试验。结果表明: 小的喷孔直径、较多的喷孔以及适当的上下层喷孔喷射夹角可提高油束的雾化质量。

关键词: 喷油嘴; 燃油系统; 响应面模型; 参数; 优化

中图分类号: TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)06-0017-05

Optimization of Double-Layer Nozzle Parameters Based on Response Surface Approximation Model

Gong Xinrui, Liu Zhenming, Huang Xinyuan, Liu Nan

(Naval University of Engineer, Hubei Wuhan 430033)

Abstract: The double-layer staggered nozzles used on the common rail diesel engines can improve the economy and emission performance of the diesel engines. In order to optimize the matching between the two-stage staggered nozzle and the combustion chamber, the CFD calculation software and the central combined test design method were used to design the test calculation matrix of the fuel system parameters for numerical calculation, and then constructed the optimization objective function of combustion and emission with the response surface approximation model. Finally, the multi-island genetic algorithm was used to globally optimize the approximate model, the optimal combination of fuel system parameters was determined, and bench test was carried out to verify the optimization program. The results show that small injection hole diameter, more injection holes and appropriate injection angle of the upper and lower rings of injection holes could help to improve the atomization quality of fuel spray.

Key words: nozzle; fuel system; response surface model; parameter; optimization

0 引言

采用双层交错布置喷孔油嘴可以使油束在燃烧室轴向及径向空间均匀分布, 减少局部富氧和富油区, 从而进一步改善柴油机的经济性和排放性^[1-3]

对于一定的燃烧室形状, 各运行工况都对应一

个最优的喷射系统参数设计^[4-5]。然而不同的喷射系统参数间存在着复杂的交互作用和制约关系, 即某个参数对柴油机工作过程及性能的影响并不是孤立的, 因此得出最优的燃油系统参数须进行大量的方案试制和配试工作, 费时费力且代价高昂。用 CFD 专业软件可以比较准确地模拟喷射系统参数

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2019-02-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51879269); “十三五”国防预研项目 (3020401030303)。

作者简介: 龚鑫瑞(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为内燃机结构与燃烧性能, 739554968@qq.com。

对高压共轨柴油机燃烧和排放性能的影响,但要得到最优方案,必然消耗较高的计算成本^[6]。因此,基于统计学理论的计算量小、在一定程度上可以保证设计准确性的近似模型方法开始得到关注。在 CFD 优化设计过程中,用近似模型取代耗时的高精度计算流体动力学分析,可以加快设计过程,降低设计成本,有效平衡 CFD 计算成本和计算准确性这一矛盾。

本文以采用双层交错布置喷孔油嘴的某型高压共轨柴油机为研究对象,以经济性、排放性和燃烧噪声为评价指标,运用多岛遗传算法对喷射始点、喷孔个数、喷孔直径、上层喷孔的喷射夹角、下层喷孔的喷射夹角和喷嘴伸出高度 6 个喷射系统参数进行优化研究。

1 计算模型验证

试验在一台四冲程 6 缸高压共轨柴油机上进行。该柴油机的基本技术参数如表 1 所示。

表 1 柴油机基本技术参数

发动机型式	6 缸, L 型, 水冷, 四冲程
缸径 × 冲程/mm × mm	170 × 195
连杆长度/mm	350
额定转速/(r · min ⁻¹)	1 500
额定功率/kW	680
压缩比	13.5
排量/dm ³	26.58

图 1 为本文试验所用的双层交错布置喷孔喷嘴的结构示意图。该喷嘴喷孔数为 8, 上下层喷孔直径相同, 为 0.29 mm, 上层喷孔喷射夹角为 155°, 下层喷孔喷射夹角为 145°, 喷射始点为 20°。

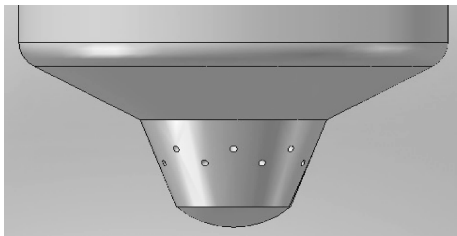


图 1 双层交错布置喷孔喷嘴结构示意图

采用 AVL 公司的 CFD 软件 FIRE 对该共轨柴油机喷雾与燃烧过程进行模拟。湍流模型选用 $k-\epsilon-f$ 模型, 雾化模型选用 KH-RT 破碎模型, 燃油蒸发模型选用 Dukowicz 模型, 燃烧模型选用 ECFM-3Z 模型, NO_x 排放模型选用 Zeldvich 模型, 碳烟排放模型选用 Kennedy-Hiroyasu-Magnussen 模型。

图 2 所示为燃烧室计算网格。计算时不考虑

进、排气的影响,从进气门关闭时刻 200 °CA 开始计算,到排气门开 470 °CA 计算结束。结合原机试验数据给定初始时刻的相关边界条件,计算工况为原机 100% 额定负荷。初始时刻假设缸内气体均匀,具有相同的温度和压力,初始压力 0.25 MPa,缸内温度 340 K;温度边界采用恒温边界,不考虑活塞运动和缸内燃烧对温度的影响,分别取缸盖底部、燃烧室壁面、缸盖壁和缸套壁的平均温度作为边界温度。缸盖底部温度 553 K;燃烧室壁面温度 593 K,缸盖壁温为 553 K,缸套壁温为 403 K。

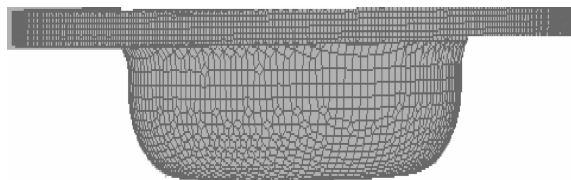


图 2 燃烧室计算网格

图 3 为缸压仿真值与试验值的对比。可见缸内压力曲线的仿真值和计算值在燃烧和膨胀阶段吻合很好,只是在压缩过程略有差别,主要是因为初始条件的设置状态不能与实际完全一致所致。由此可见,所建仿真模型能较好地模拟采用双层交错布置喷孔油嘴的高压共轨柴油机的工作过程。

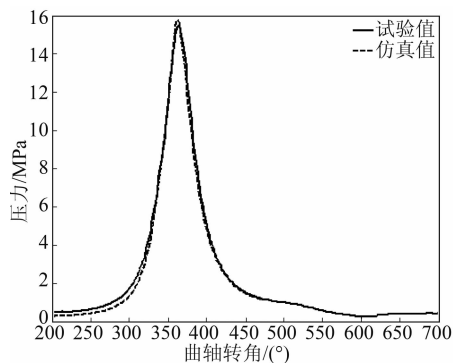


图 3 缸内压力仿真值与试验值对比

2 优化参数与目标函数

2.1 优化参数

本文主要通过对采用双层交错布置喷孔油嘴的高压共轨柴油机喷射系统参数进行优化,使柴油机在额定负荷下的燃油消耗率、NO_x 排放、soot 排放以及燃烧噪声达到较优的水平。被选取优化的喷射系统参数主要有:喷射始点、喷孔个数、喷孔直径、上层喷孔喷射夹角、下层喷孔喷射夹角、喷嘴伸出高度。

2.2 目标函数

本文对喷射系统参数优化的主要目标是降低油

耗, 提高效率, 同时保持较低的 NO_x 和 soot 排放以及燃烧噪声。如此, 根据多变量处理方法的统一目标法设计的综合目标函数为^[7]:

$$f = \frac{1\ 000}{\left(\frac{\text{NO}_x}{(\text{NO}_x)_0}\right) + \left(\frac{\text{soot}}{(\text{soot})_0}\right)^2 + \left(\frac{dp/d\varphi}{(dp/d\varphi)_0}\right) + \left(\frac{\text{BSFC}}{(\text{BSFC})_0}\right)^4} \quad (1)$$

式中: $(\text{NO}_x)_0$ 、 $(\text{soot})_0$ 、 $(dp/d\varphi)_0$ 、 $(\text{BSFC})_0$ 分别为 NO_x 、soot、压力升高比和燃油消耗率的目标值, 其中分母部分的指数大小表示优化目标的相对重要性。

3 仿真试验设计与近似模型建立

3.1 仿真试验设计

本文选用中心复合法 (CCD) 进行仿真试验设计。中心复合法设计由 $2n$ 全因子设计、轴点设计 (也叫星点设计) 与零水平中心点重复试验 3 部分构成; 采用影响因子的二次多项式来预测其对评价指标的作用。该方法扩展了设计空间并得到高阶信息, 能够给响应表面近似模型提供样本数据, 具有设计简单、试验次数少、预测性好等优点。比例因子 $\alpha < 1$ 时, 星点位于全因子设计内部; $\alpha > 1$ 时, 星点位于全因子设计外部; $\alpha = 1$ 时, 星点位于全因子设计表面的中心。本设计共有 6 个因素, 77 种试验方案, 各因素的水平设置如表 2 所示。

表 2 各因素的水平设置

因素	最大值	最小值	中心点	α
喷射始点/(°) BTDC	24	4	14	0.5
喷孔个数	14	6	10	0.5
喷孔直径/mm	0.4	0.24	0.32	0.5
喷射夹角 α_1 /(°)	160	150	155	0.5
喷射夹角 α_2 /(°)	145	115	130	0.5
喷嘴伸出高度/mm	7	3	5	0.5

在 FIRE 软件中, 计算 1 个算例需 11 h, 因此必须考虑优化周期的问题。本文选用中心复合法进行试验设计, 可保证在应用响应面模型寻优时在各个方向都能得到较精确的解。

在 FIRE 软件的 2Dresult 中, 可以得到 NO_x 、soot 和缸内压力随曲柄转角的变化曲线, 对 $P-\Phi$ 图进行处理可以得出压力升高率和油耗率。由于仿真计算从进气门关开始到排气门开结束, 计算所得的指示功较实际小, 因此计算得到的油耗率较实际的大。而本文主要对共轨柴油机在额定工况下的喷雾和燃烧排放过程进行仿真计算和参数

优化。

3.2 响应面近似模型建立

响应面近似模型通过较少的试验在局部范围内比较精确地逼近函数关系, 并用简单的代数表达式展现出来, 计算简单, 给设计优化带来极大的方便。本文选用二次多项式响应面模型来构造近似模型, 其数学表达式如下^[8]:

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{j < i}^n a_{ji} x_j x_i \quad (2)$$

式中: n 为设计变量个数; x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为设计变量; a_0 、 a_i 、 a_{ii} 、 a_{ji} 为多项式系数。

由仿真试验的计算结果, 利用 iSIGHT 软件的 Approximation 模块构造的目标函数 f 与喷射系统参数间的二阶多项式响应面近似模型公式为:

$$f(x) = 851.82 + 5.02n - 1.91d - 0.06h - 2.67\varphi - 9.85\partial_1 - 1.06\partial_2 + 0.24n^2 - 0.01d^2 + 0.27h^2 - 0.003\varphi^2 + 0.03\partial_1^2 + 0.001\partial_2^2 + 0.02nd - 0.2nh + 0.02n\varphi - 0.03n\partial_1 - 0.02n\partial_2 - 0.05dh + 0.03d\varphi + 0.01d\partial_1 + 0.01d\partial_2 - 0.05h\varphi - 0.006h\partial_1 + 0.009h\partial_2 + 0.008\varphi\partial_1 + 0.008\varphi\partial_2 + 0.003\partial_1\partial_2 \quad (3)$$

在 iSIGHT 中, 用模型的决定系数 R^2 和调整决定系数 R_{adj}^2 的值判断其响应的有效性, R^2 和 R_{adj}^2 越接近于 1 时, 说明近似模型拟合得越好。本模型的决定系数 R^2 和调整决定系数 R_{adj}^2 的值分别为 0.874 39 和 0.812 81, 表明近似模型拟合效果较好。

4 仿真计算与优化匹配结果及分析

4.1 基于中心复合法试验设计最优结果

以目标函数 f 为评价指标时, 运用中心复合法 (CCD) 设计的仿真试验方案中喷射系统参数的最优组合方案如表 3 所示。

表 3 以 f 为指标评价喷射系统参数的最优方案

喷孔直径/mm	喷孔数	喷嘴伸出高度/mm	上层喷孔喷射夹角/(°)	下层喷孔喷射夹角/(°)	喷射始点/(°) BTDC
0.4	6	3	150	145	24

4.2 基于近似模型的全局优化结果

以目标函数 f 为评价指标, 基于响应面近似模型, 运用多岛遗传算法的全局优化计算结果见表 4 所示。目标函数 f 以经济性为主, 最终优化结果是选择小的喷孔直径、较多的喷孔以及适当的上、下层喷孔喷射夹角, 来提高油束与空气混合的均匀度, 提高燃烧室内空气的利用率, 混合气形成的质量好。

表 4 以 f 为评价指标喷射系统参数的全局优化结果

喷孔直径/mm	喷孔数	喷嘴伸出高度/mm	上层喷孔喷射夹角/(°)	下层喷孔喷射夹角/(°)	喷射始点/(°) BTDC
0.32	8	3	155	145	20

4.3 优化结果对比分析

基于响应面近似模型的全局优化结果和利用中心复合法试验设计优化得到的结果有一定的差别。用序号 a 表示基于中心复合法优化的方案，用序号 b 表示基于响应面近似模型，运用多岛遗传算法优化的方案，对两种方案的喷射过程和缸内工作过程进行仿真计算并做对比分析；加工方案 b 的喷嘴，在试验台架上进行配机试验，验证优化效果以及整个过程的正确性。

图 4 为方案 a 的缸内压力仿真计算结果和方案 b 的仿真与试验结果比较。由图可知：方案 b 的仿真与试验结果吻合较好；方案 a 的缸压峰值较方案 b 靠前，主要是方案 a 的喷油提前角较大的缘故。

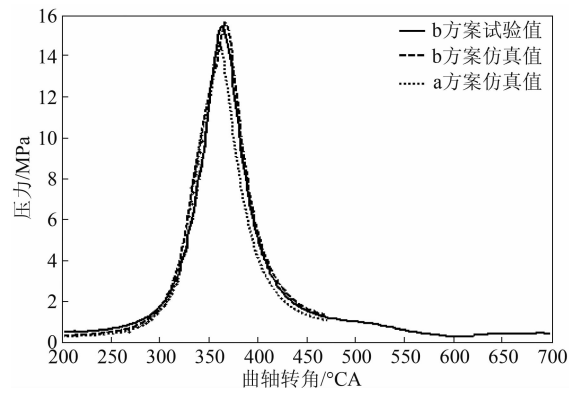


图 4 方案 b 的仿真与试验结果和方案 a 的仿真计算结果

图 5 为两种方案在 10° BTDC、5° BTDC、0° BTDC 和 5° ATDC 四个时刻缸内温度分布的切片图。方案 a 的喷射始点大，喷孔直径大，在上止点时已喷入缸内雾化混合的燃油较多，因此燃烧迅速，温度较高，最高温度达 2 600 K，并且高温区已向余隙区扩展，而方案 b 油束才刚刚着火。

表 5 为两种方案的计算结果及目标函数 f 的计算值与优化值比较。可以看出：两种方案的碳烟排放量相差不大，方案 b 的燃油消耗率比方案 a 要低，压升率和 NO_x 排放较方案 a 的要高。

表 5 两种方案的计算结果及目标函数 f 的计算值与优化值比较

方案	$\text{NO}_x/ \times 10^{-6}$	soot/ $\times 10^{-6}$	BSFC/ g	$\frac{dP}{d\Phi}$	f		
					仿真值	优化值	误差/%
a	15.602 8	12.091 9	174.8	0.661	64.75	66.922 4	3.24
b	28.450 7	15.783	166.21	0.84	69.628	68.408	1.76

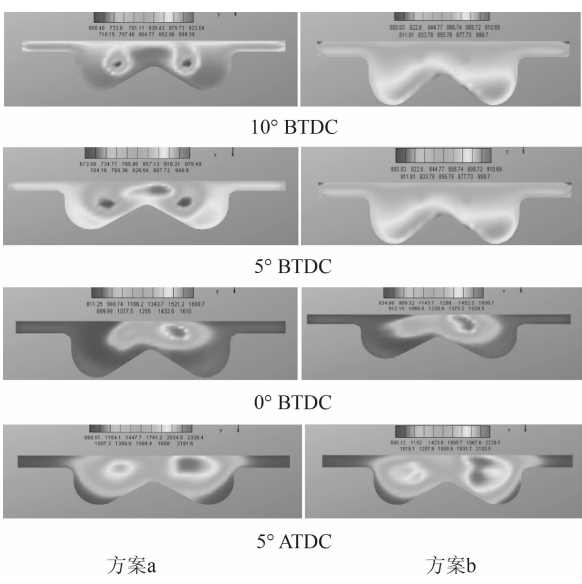


图 5 不同喷嘴方案的不同时刻缸内温度分布

5 结论

本文优化的喷射系统参数主要有：喷射始点、喷孔个数、喷孔直径、上层喷孔喷射夹角、下层喷孔喷射夹角、喷嘴伸出高度。运用中心复合法设计了燃油系统参数的试验计算矩阵，运用遗传算法确定了燃油系统参数的优化组合，对优化结果进行仿真计算，并在试验台架上进行优化方案的配机试验，验证了优化效果以及整个优化过程的可取性。得出的主要结论如下：

- (1) 对于多变量、多目标的非线性优化问题，试验计算矩阵的编制方法、近似模型的构造方法以及综合目标函数的制定都会对最终优化结构产生影响。
- (2) 试验设计 (DOE) 法在多因素对多指标试验数据分析过程中能最大程度地利用数据信息，并清晰反映出因素对指标的重要程度和影响趋势；但优化结果为试验水平范围内的近似解而非全局最优解。
- (3) 对于双层交错布置多孔喷嘴的参数优化，可以根据优化目标的主次，通过调节综合目标函数 f 分母部分的相应目标指数进行优化，这样可使主要优化目标达到最优值，其他相应优化目标满足条件的最优或者较优值。
- (4) 基于响应面近似模型的全局优化结果表明：小的喷孔直径、较多的喷孔以及适当的上、下层喷孔喷射夹角可提高油束的雾化质量。

参考文献

- [1] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [2] 苏万华, 赵华, 王建昕, 等. 均质压燃低温燃烧发动机理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] KILIC A, SCHULZE L, TSCHOKE H. Influence of nozzle parameters on single jet flow quantities of multi-hole diesel injection nozzles [C]. SAE 2006-01-1983, 2006.
- [4] SATAKE K, MONAKA T, YAMADA S, et al. The rapid development of diesel engine using an optimization of the fuel injection control [R]. Mitsubishi Heavy Industries Limited. Tech Rev, 2008, 45: 6-10.
- [5] PAYRI F, BERMUDEZ V, PAYRI R, et al. The in-

fluence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles [J]. Fuel, 2004, 83: 419-431.

- [6] HUANG H Z, SU W H, PEI Y Q. Optimization study on multi-pulse injection parameters of MULINBUMP compound combustion system II: optimization of five-pulse injection parameters [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27 (4): 289-297.
- [7] 阳明盛, 罗长童. 最优化原理、方法及求解软件 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] LEE T, REITZ R D. Response surface method optimization of a HSDI diesel engine equipped with a common rail injection system [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2003, 04, 01.

(上接第 9 页)

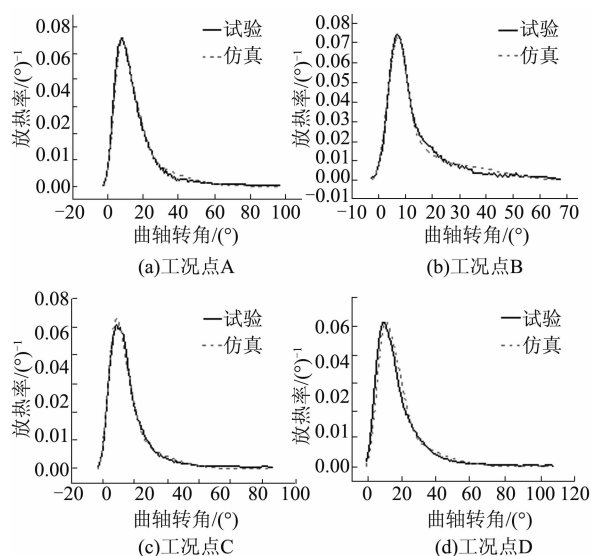


图 10 试验与经验模型计算放热率对比

4 总结

(1) 低速二冲程柴油机放热率受到多参数的影响。燃烧始点受喷油正时影响最大, 随喷油正时推迟, 燃烧始点推迟。发动机负荷和油轨压力对燃烧始点影响较小。

(2) EGR 对燃烧过程影响主要体现在燃烧持续期。小 EGR 率对燃烧过程影响不大, EGR 率高于 26% 后, 燃烧速率降低, 燃烧持续期延展, CA50 推迟, 燃烧过程向后燃偏移, 指示热效率降低。

(3) 喷油正时的提前和共轨压力的上升使 CA50 明显提前, CA50 和指示热效率存在相关性, CA50 提前, 燃烧更加集中, 指示热效率更高。

(4) 本文基于试验数据拟合特征参数获得的三韦伯放热率经验模型在各个工况都有较好的吻合度, 能够用于低速二冲程柴油机的性能模拟研究。

参考文献

- [1] 刘颖. 船舶柴油机原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [2] 文李明. 船用低速二冲程柴油机燃油喷射系统发展概述 [J]. 柴油机, 2016, 38 (1): 24-28.
- [3] 任自中. 国外大功率柴油机电喷电控系统的新进展 [J]. 柴油机, 2008, 30 (5): 7-12.
- [4] KALTOFT J. Tier III EGR for large 2-stroke MAN B&W diesel engine [C]. International Symposium on Marine Engineering, 2001, paper-ISMES86.
- [5] CERNIK F. Phenomenological combustion modeling for optimization of large 2-stroke marine engines under both diesel and dual fuel operating conditions [D]. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum, 2018.
- [6] 丰琳琳. 二冲程低速柴油机工作过程与增压系统的计算研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [7] 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, 1998.