智能化与控制

高压共轨柴油机喷射系统参数优化方法研究

赵 峰1, 邵利民1, 苏 平2

(1. 海军上海地区装备修理监修室, 上海 200136; 2.91251 部队, 上海 200940)

摘 要:提出了基于代理模型的高压共轨柴油机喷射系统参数优化方法。首先通过试验数据对 CFD软件中的喷雾燃烧模型进行了校核和验证,然后利用中心复合法进行试验设计,并用 CFD 软件进行仿真计算试验,由此建立响应面代理模型,最后对此模型进行全局寻优,得出了最优的 喷射系统参数。

关键词:高压共轨柴油机;燃油喷射系统;参数;优化方法 中图分类号:TK423.8⁺4 文献标识码:A 文章编号:1001-4357(2013)06-0005-04

Study on Optimization Method of High Pressure Common Rail Diesel Engine Injection System Parameters

Zhao Feng¹, Shao Limin¹, Su Ping²

(1. Navy Equipment Repair Superintend Office for Shanghai District, Shanghai 200136;2. No. 91251 Unit, Shanghai 200940)

Abstract: The optimization method of the high pressure common rail diesel engine injection system parameters was put forward based on approximate model. First the spray and combustion model in CFD software were verified and validated through the test data, and central composite method was used to design the experimental matrix, and the simulation calculation experiment was carried out with CFD, thus the response surface approximate model was established. Finally the global optimization was done with the approximate model, and the optimal parameters of injection system were obtained.

Keywords: high pressure common rail diesel engine; fuel injection system; parameters; optimization method

0 引 言

喷射系统匹配是优化高压共轨柴油机燃烧过程 的关键,其核心是如何合理确定油束在燃烧室内的 雾化程度及时空分布,主要需要优化的参数有喷孔 在燃烧室的空间位置、喷孔数、喷孔直径、喷射压 力、喷油规律等^[1,2]。由于柴油机燃烧系统的复杂 性,决定了在优化系统参数时存在着一定的困难, 因此它们的匹配优化问题属于多变量、多目标的非 线性规划问题,选择或设计一种精度高、成本低的 优化方法,就成为优化研究工作的重要课题^[3,4]。 本文研究了适合于高压共轨柴油机喷射系统参数优 化的方法,并对优化方案进行仿真计算和台架试验,验证优化效果以及整个优化过程的正确性。

1 优化设计流程

本文提出的喷射系统参数优化设计流程如图 1 所示。从图中可以看出,整个过程主要分为两个部 分,第一部分主要是利用喷雾和燃烧试验数据对 CFD 软件中的喷雾燃烧模型进行校核验证,提高 软件的精确度和适用性;第二部分是利用验证过的 CFD 软件进行仿真计算试验,并建立代理模型、 选择优化算法进行优化设计、试验验证。

收稿日期: 2013-02-22 作者简介: 赵峰(1979-), 男, 工程师, 主要研究方向为船舶动力系统设计、维修及质量管理, E-mail: slmzf1226@ sina. com。



图 1 喷射系统参数优化设计流程

2 喷雾与燃烧模型的校核与验证

2.1 喷射特性试验

试验用柴油机为 TBD234V6 柴油机,根据其缸 头的结构特点和研究需要,设计了八种不同喷孔直 径和个数、不同长径比 L/D、不同喷射夹角的非轴 对称喷嘴,喷嘴型式为 mini-sac,安装夹角均为 20°,设计的喷嘴结构如图 2 所示,具体设计方案 如表1 所示。

建立了高速闪光摄像测试台架,对不同喷嘴结构和不同喷射背压下的喷雾形态进行了试验,并对 图像进行处理分析,得到喷雾贯穿距和喷射锥角的 发展过程。图3为方案6喷嘴在喷射压力150 MPa、 背压2 MPa下的雾束发展过程。



图 2 喷嘴结构图

2.2 燃烧试验

TBD234V6 柴油机的主要性能参数如表 2 所

示。对上述八种喷嘴结构喷油器在不同喷油提前角 和不同功率下柴油机的燃烧和排放特性影响进行测 试,为喷雾和燃烧模型提供校核和验证标准,主要 测试参数有缸内压力、油耗、烟度和 NO_x 等参数。 图 4 为方案 1 在额定负荷时不同喷油提前角时的缸 内压力曲线。

方案	孔数	孔径/mm	喷射夹角/(°)	L/D
1	6	0.2	140	3.5
2	6	0.15	140	4.6
3	8	0.2	140	3.5
4	8	0.13	140	5.4
5	6	0.2	110	3.5
6	6	0.2	110	4.5
7	8	0.13	110	5.4
8	8	0.13	110	6.9

表1 喷嘴设计方案

0.05 ms 1.0 ms 1.5 ms

2.0 ms 2.3 ms 2.5 ms

图 3 喷射雾束发展过程

表 2 试验用柴油机主要性能参数

发动机型号	MWMTBD234		
发动机型式	6缸,V型,四冲程,直喷式		
缸径×冲程/mm×mm	128×140		
曲柄/连杆	0. 255		
额定转速/(r•min ⁻¹)	1 500		
额定功率/kW	186		
压缩比	15		



图 4 不同喷油提前角时缸内压力曲线

2.3 喷雾与燃烧模型的校核与验证

本文以喷雾试验和燃烧试验采集的测试数据为

数值模拟的验证标准,对 CFD 软件 FIRE 中的喷雾 破碎和燃烧模型进行验证,检验其模拟精度,确定 大致的误差带,并提出针对不同喷嘴结构的喷雾和 燃烧模型参数的设置方法,以便在设计工作中使用 这些数值结果。

对 FIRE 中的 KH-RT 二次油滴破碎模型进行了 验证。从文献[5]中得知影响喷雾贯穿距的主要参 数为破碎时间常数 C_2 ,因此以喷雾贯穿距试验数 据为验证标准,经过对不同 C_2 值的计算比较,可 以确定不同方案喷嘴各喷孔喷雾计算 C_2 的取值。 通过对八套喷嘴方案的验证,可以得到各喷孔 C_2 的参数设置,由此推导出 C_2 与喷嘴结构参数的关 系式,准确模拟不同结构喷嘴的喷雾发展过程。

构造 C₂ 与喷孔数、孔径、长径比和喷射夹角的函数关系式如下:

 $C_2 = a_1 \times d^{a_2} \times (l/d)^{a_3} \times (1 + \cos \alpha)^{a_4}$ 式中, a_i 为公式系数,d为喷孔直径,l/d为喷孔 长径比, α 为喷孔与喷油器轴线的夹角。

上式是一个非线性数学模型,可以通过给定模型中待定参数的初始值后,采用最小二乘迭代的方法回归求解方程,由此建立变量参数与目标参数之间的具体数学模型。在 Matlab 中利用 lsqcurvefit 函数进行最小二乘法非线性曲线拟合,得到的 C_2 计算方程的最佳拟合系数为: a_1 =31.241 9; a_2 =-0.180 6; a_3 =0.179 6; a_4 =0.376 1

燃烧模型采用相关火焰三区燃烧模型(ECFM-3Z),模型中主要讨论混合模型常数 βm^[6]。对模 型进行校核时发现不同 βm 取值下,缸内压力曲线 变化很小,说明 ECFM-3Z 模型对经验参数的设置 不是很敏感。

图 5 为方案 5 喷嘴在 80% 额定工况,喷射始点 为 10degBTDC 时缸内压力及燃烧放热率仿真曲线与 试验曲线的比较。从图中可以看出,缸内压力曲线 基本一致,放热率曲线有一定的差别,试验的放热 率曲线有明显的双峰现象,两峰值之间有5°CA的间 隔,而仿真曲线在预混合燃烧的峰值较大,且扩散 燃烧很快开始,燃烧持续时间也较试验的短,说明 仿真模型的湍流混合速率还是较实际的快。

3 喷射系统参数优化设计

3.1 优化参数和目标函数

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、喷射夹角、喷孔长径比、喷 嘴伸出高度。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。这样根据多变量处理方法中的 目标达到法设计的目标函数为:

ſ_	1 000
-	$\overline{\left(\frac{NO_x}{(NO_x)_0}\right)} + \left(\frac{soot}{(soot)_0}\right)^2 + \left(\frac{dp/d\varphi}{(dp/d\varphi)_0}\right) + \left(\frac{BSFC}{(BSFC)_0}\right)^{20}$
式	中, $(NO_x)_0$ 、 $(soot)_0$ 、 $(dp/d\varphi)_0$ 、 $(BSFC)_0$ 分别
¥.,	NO 正力北京以和做油湖赵亥的日后店



图 5 缸内压力及燃烧放热率仿真与试验曲线

3.2 仿真试验

本文选用中心复合法(CCD)进行试验设计, 使用中心复合法能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,根据此方法共有 77种试验方案。

根据试验设计方案应用 Pro/Engineer 进行不同 喷嘴结构喷油器内部流通区域的三维几何造型,再 生成.stl 文件导入 FIRE 软件生成计算网格并进行 两相流计算,得到各喷孔的流量系数、喷油规律以 及 nozzle 文件,与喷雾和燃烧模型进行耦合计算, 最终得到各方案的缸内压力、燃油消耗率、排放值 等仿真试验结果。

3.3 基于代理模型的参数优化

根据仿真试验结果,利用 iSIGHT 软件中的 Approximation 模块来构造目标函数与多变量间的响 应曲面近似模型,构造目标函数与优化参数间的二 阶多项式响应面代理模型为:

$$\begin{split} f(x) &= -473 + 7.\ 89\delta + 3\ 638d - 137h - 22\,(\,l/d\,) + \\ 5.\ 37n + 2.\ 64\varphi - 0.\ 006\delta^2 - 8\ 252d^2 + 11.\ 2h^2 + 3.\ 28\,(\,l/$$

 $\begin{aligned} d)^{2} &- 17.58\delta d + 0.056\delta h - 0.0362\delta (l/d) - 0.33\delta n + \\ 0.024\delta \varphi + 61.2dh - 28.64d (l/d) + 102.735dn - \\ 21.55d\varphi + 1.0089h(l/d) + 3.368hn + 0.157h\varphi - 0.508(l/d)n - 0.0074(l/d)\varphi - 0.4n\varphi \end{aligned}$

式中, δ 为喷射夹角,单位(°);d为喷孔直径, 单位 mm;h为喷嘴伸出高度,单位 mm,l/d为喷 孔长径比,n为喷孔数, φ 为喷油提前角,单位 (°)BTDC。

响应模型的决定系数 R² 和调整决定系数 R² adj 的值分别为 0.874 39 和 0.812 81,由此可见,代 理模型与实际响应间存在一定的误差,这主要是由 于设计参数之间相互耦合制约,试验设计方法不能 保证这种复杂设计空间完全充满造成的。 在此模型基础上采用 iSIGHT 软件中的多岛遗 传算法结合顺序二次规划算法优化方案,对喷射系 统参数进行优化。本次优化共计算了 6 080 步,目 标函数 f 的计算过程轨迹如图 6 所示, f 最终优化 值为 81.73,各喷射参数优化结果如表 3 所示。



图 6 目标函数 f 的计算过程轨迹

表3 喷射参数优化结果

喷孔直径/mm	喷孔数	喷孔长径比	喷射夹角/(°)	喷嘴伸出高度/mm	喷射始点/(°)BTDC
0. 145	7	3	150	3	8

对上表中的优化方案分别进行了仿真计算和喷 嘴加工配机试验,验证优化效果以及整个优化过程 的正确性。由仿真计算结果得出的目标函数f的值 为 84.82,图 7 为仿真计算与试验测试的缸内压力 曲线,表4 为配机试验结果原机试验值的比较。从 结果上看,缸内压力曲线仿真与计算值基本一致, 仿真计算的f值与优化值相差也很小,柴油机燃油 消耗率比原机降低了 5%,NO_x和碳烟排放分别比 原机降低 10% 和 18%,只是空气噪声略高,由此 说明本文提出的喷射系统参数优化设计方法是可信 可取的。



图 7 优化方案仿真与试验的缸内压力曲线

表 4	配机试验结果与原机试验值的比较

测试 参数	噪声 /dB	NO_x $/10^{-6}$	烟度 (不透光度)	燃油耗率 /(g•(kW•h) ⁻¹)
原机	106	1 163	10.9%	203
优化后	109	1 057	9.0%	192

4 结 论

(1)对 FIRE 软件中的 KH-RT 喷雾破碎模型进 行校核和验证后,提高了喷雾和燃烧模型的适用性 和仿真精度。

(2)利用遗传算法结合顺序二次规划算法的优 化方法进行喷射系统参数的优化设计能够快速的进 行优化空间的全局寻优,且能得到可信的优化 结果。

(3)本文提出的基于代理模型的喷射系统参数 优化设计方法,具有成本低、效率高、结果优的 特点。

参考文献

- [1] 李小平,姜北平,解方喜,等. 喷射参数对柴油机燃烧与 排放特性的影响[J]. 内燃机学报,2012(2).
- [2] Panagiotis Andreadis, Christos Chryssakis, Lambros Kaiktsis. Optimization of injection characteristics in a large marine diesel engine using evolutionary algorithms [C]. SAE 2009-01-1448.
- [3] 刘晖.代理模型方法在轿车乘员约束系统仿真优化中的应用研究[D].长沙:湖南大学,2008.
- [4] 邵利民. 高压共轨柴油机喷射系统参数优化研究[D]. 武汉:海军工程大学,2010.
- [5] 解茂昭.内燃机计算燃烧学(第二版)[M].大连:大连 理工大学出版社,2005.
- [6] 石秀勇,李国祥.基于拟序火焰模型的柴油机燃烧过程 数值模拟[J].车用发动机,2007,170(4):31-36.