

智能化与控制

高压共轨柴油机标定优化研究

范 凯¹, 陈 宏², 刘振明³, 欧阳光耀³

- (1. 海军驻江南造船(集团)有限责任公司军事代表室, 上海 200129;
2. 海军驻洛阳四〇七厂军事代表室, 河南洛阳 471003;
3. 海军工程大学船舶与动力学院, 湖北武汉 430033)

摘 要: 针对自主开发的高压共轨电控柴油机, 以经济性作为优化目标, 以排放物的量值低于排放法规所限定的量值为约束条件, 利用离线稳态优化标定方法, 对控制参数如轨压、喷油提前角等的 MAP 进行了优化标定; 研究了轨压、喷油提前角等参数对燃油消耗率和 NO_x 排放的影响。研究结果表明: 经控制参数优化, 在全工况下, 该高压共轨柴油机的燃油消耗率下降约为 6%。

关键词: 高压共轨柴油机; 控制参数; MAP; 优化

中图分类号: TK421+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2012)02-0001-03

Calibration Optimization of High Pressure Common Rail Diesel Engine

Fan Kai¹, Chen Hong², Liu Zhenming³, Ouyang Guangyao³

- (1. Naval Deputy Office of Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129;
2. Naval Deputy Office of 407 Factory, Henan Luoyang 471003;
3. School of Marine and Power Engineering, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033)

Abstract: In order to optimize the economic performance of a self-developed high pressure common rail electronic control diesel engine, as well as limit the emissions within the regulations standard, the MAP of its controlling parameters, such as common rail pressure, injection advance angle, etc. are calibrated optimally with the method of off-line stationary optimum calibration. The influence of the above mentioned parameters on fuel consumption rate and NO_x emission are studied. Research results showed that after the optimization, the fuel consumption rate of this high pressure common rail diesel engine decreased about 6%.

Keywords: high pressure common rail diesel engine; controlling parameters; MAP; optimization

0 引 言

高压共轨柴油机喷射控制的参数都是以数据文件的形式(MAPs、Curves、Constants)存储在电控单元(ECU)内, 柴油机运行时根据每个工况读取相应的数据对执行单元进行实时控制。这些数据 MAP 都是通过大量标定试验, 修改和优化数据后再由相应的标定软件绘制而成。不同的柴油机有不同的喷射控制 MAP, 因此, 针对不同的柴油机必须进行 MAP 数据的优化标定。

本文利用离线稳态优化标定方法, 对自主开发的高压共轨柴油机控制参数 MAP 进行了优化标定, 并进行了试验。

1 控制参数 MAP 优化数学模型

将燃油经济性作为共轨柴油机控制参数优化目标, 以排放物的量值低于排放法规所限定的量值为约束条件, 对主喷提前角和轨压等参数进行优化标定。燃油经济性优化问题的数学模型为:

$$\begin{aligned} &\min b_e(n, Q, \theta, P_{cr}) \\ &T_p \leq T_{plim} \\ &P_b \leq P_{blim} \\ \text{s. t. } &NO_x \leq (NO_x)_{lim} \\ &\lambda \leq \lambda_{lim} \end{aligned}$$

(1)

式中： b_e 为燃油消耗率； n 为柴油机转速； Q 为循环喷油量； P_{cr} 为轨压； θ 为主喷定时； T_p 为排温； T_{plim} 为排温最高限制值； P_b 为燃烧压力； P_{blim} 为燃烧压力限制值； $(NO_x)_{lim}$ 为 NO_x 排放限制值； λ_{lim} 为烟度限制值。优化目标是 b_e ，优化参数是 P_{cr} 和 θ ，即通过标定优化参数 P_{cr} 和 θ ，使得柴油机在满足约束条件的前提下，在每一个工况点 (n, Q) 达到最低燃油消耗率。

2 控制参数 MAP 优化

目前，常用的优化标定方法主要有三种：人工手动优化标定、离线稳态优化标定和在线自动优化标定。

人工在线标定方法标定成本较高且标定质量不高，不能满足工程实践的要求；而购置国外先进自动标定系统价格又过于昂贵。基于模型的离线稳态优化标定方法可以较好地解决上述问题。该方法包括三个步骤：首先通过试验设计选择有限个合理试验工况点，然后利用测试数据建立发动机性能参数与控制参数之间的数学模型，最后利用模型对电控系统控制参数进行优化。

2.1 试验设计

试验设计的目的就是确定如何收集数据，以供统计推断之用。为了较精确地预测电控参数与柴油机性能之间的响应关系，应该使试验点具有代表性并尽可能覆盖柴油机所有工况。

本文所研究的某共轨柴油机用作柴油发电机组，选择 10 个工况点为设计试验点，分别对应共轨柴油机 10%~100% 负荷工况，工况点选择如表 1 所示。在每个工况点，改变两个因素：主喷提前角和轨压，每个因素设置五个水平，因素与水平设置如表 2 所示。在每个工况点，按正交试验法设计试验组合。

表 1 设计试验工况点

工况点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
循环喷油量 /(mm ³ ·str ⁻¹)	10	20	35	55	75	100	125	150	175	200
转速 /(r·min ⁻¹)	1 500									

表 2 每个试验工况点的因素水平设置

因素		水平				
A	轨压/MPa	90	100	110	120	130
B	喷油提前角/°CA	6	8	10	12	14

2.2 性能预测响应模型的建立

建立性能预测响应模型的目标是根据试验数据建立发动机的性能参数(耗油率、排放、排温等)对电控系统参数(轨压、主喷提前角等)的映射关系。为了实现精确的优化标定，响应模型必须精确和具有很好的预测泛化能力。目前常用的建模方法主要有多项式(POLY2)、多样条函数 PolySpline、生长模型(mmF)、自由节点样条函数(FK2)等。

在试验设计所得到的 10 个工况点对某共轨柴油发电机组进行台架试验，得到 10 组试验数据。组内数据的自变量为轨压 P_{cr} 和主喷提前角 θ 等控制参数，因变量是耗油率 b_e 、 NO_x 等柴油机性能参数。在组内利用二次多项式建立 b_e 随轨压 P_{cr} 和主喷提前角 θ 的变化关系，其表达式为：

$$b_e = aP_{cr}^2 + b\theta^2 + mP_{cr} + n\theta + kP_{cr}\theta + c$$

(2)

式中， a 、 b 、 m 、 n 、 k 、 c 为回归系数。

对 10 个工况点的 10 组数据分别进行上述的二次多项式拟合，可以得到不同工况点下耗油率 b_e 随轨压和主喷提前角的变化函数，同样也可以得到 NO_x 随轨压和主喷提前角的变化函数。以第 6 工况点为例，对耗油率和 NO_x 排放分别有：

$$b_e = 0.000\ 09P_{cr}^2 - 0.0054\theta^2 - 0.28P_{cr} - 4.73\theta + 0.004\ 5P_{cr}\theta + 389.28$$

(3)

$$NO_x = -0.001P_{cr}^2 - 0.89\theta^2 + 3.16P_{cr} + 143.31\theta - 0.035P_{cr}\theta - 1637.82$$

(4)

对第 6 工况点的正交试验结果进行极差分析，可以得到轨压和主喷提前角对油耗和 NO_x 排放的影响趋势，如图 1、图 2 所示。

2.3 优化标定

根据试验数据建立响应模型后就可以选择合适的优化算法对控制参数进行全局寻优。目前常用的优化算法主要有 Lagrange 乘子法、遗传算法等。本文选择采用多岛遗传算法和顺序二次规划算法，对所选择的 10 个工况下的轨压和主喷提前角进行全局寻优，例如第 6 个工况点下最优的轨压和主喷提前角分别是 130 MPa 和 6 °CA；然后对每个工况点下的轨压和主喷提前角进行插值可以获得全工况下的最优轨压 MAP 和主喷提前角 MAP。标定优化前后的 P_{cr} MAP 和 θ MAP 对比如图 3、图 4 所示。

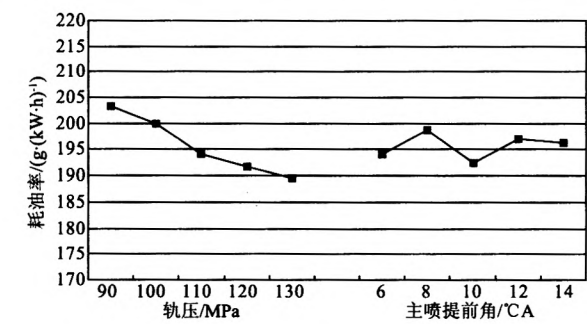


图 1 轨压和主喷提前角对耗油率的影响趋势

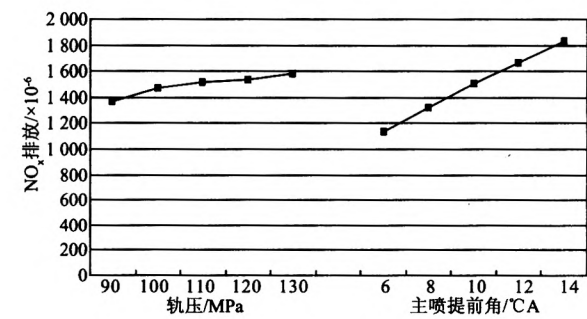


图 2 轨压和主喷提前角对 NO_x 的影响趋势

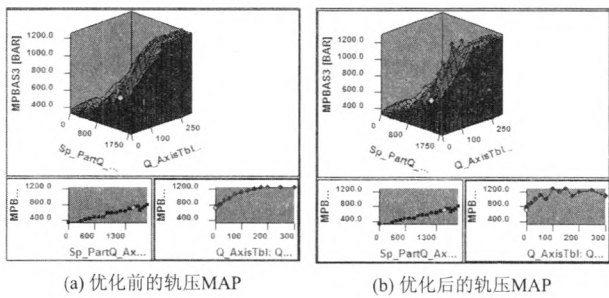


图 3 优化前后的轨压 MAP

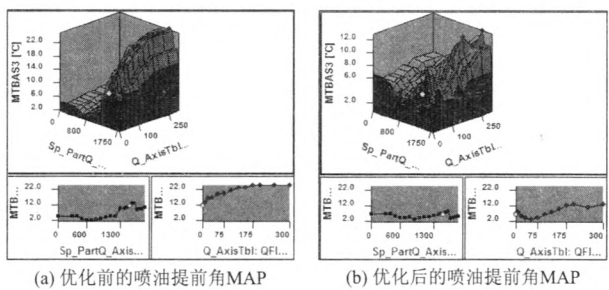


图 4 优化前后的喷油提前角 MAP

3 试 验

在共轨柴油机试验台架上利用定容积法测试了优化前后的柴油机各工况的燃油消耗率，其结果如图 5 所示。可以看出，经过对 P_{cr} 和 θ 的优化，发动机燃油经济性明显改善。实践结果表明，采用基于模型的离线稳态优化标定方法可大幅度减少试验次数和时间，对于提高标定质量和效率是非常有效的。

4 结 论

针对自主开发的高压共轨柴油机，利用离线稳态优化标定方法，以经济性作为优化目标，以排放物的量值低于排放法规所限定的量值为约束条件，对喷射控制参数轨压和喷油提前角 MAP 进行了优化标定。经过优化，在全工况下，共轨柴油机燃油消耗率下降约为 6%。

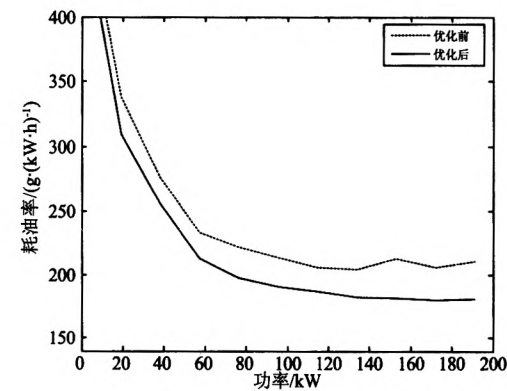


图 5 标定优化前后的负荷特性油耗曲线对比

参考文献

[1] Guerrassi N, Dupraz P. A Common rail injection system for high speed, direct-injection diesel engines [C]. SAE Paper980803, 1998.

[2] 解茂昭. 内燃机燃烧学 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.

[3] 赵选民. 试验设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[4] 夏伯忠. 正交试验法 [M]. 长春: 吉林人民出版社, 1985.