

电控喷油器仿真模型标定方法研究

张 通, 平 涛, 徐建新, 张 睿, 郭立君

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 针对电控喷油器仿真模型标定过程中, 调节变量对不同工况循环喷油量的影响程度不尽相同, 使得标定方案不易确定的问题, 采用试验设计与分析的方法(DOE), 以 3 个典型工况下的循环喷油量为控制目标, 以 6 个不易测量的流量系数、摩擦因子等为控制因子, 分析了控制目标量相对控制因子变动的敏感程度并排出主次关系, 从而指导并完成了仿真计算模型的标定。标定结果显示: 标定后的模型在各工况下的循环喷油量都达到了比较理想的精度。

关键词: 电控喷油器; 模型; 标定; DOE

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)01-0021-05

Calibration Method of Electronic Controlled Injector's Simulation Models

Zhang Tong, Ping Tao, Xu Jianxin, Zhang Rui, Guo Lijun

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: During the calibration of electronic controlled injector simulation models, on different engine load points, adjustment of variables made different effects on fuel injection quantity, which made it hard to determine the calibration program. Using the calibration method based on DOE (Design of experiments) theory, the injection quantities at three typical working points were chosen as control targets. Meanwhile, six difficult-for-measurement parameters, such as discharge coefficient and friction factor, were chosen as the control factors. Sensitivities of control factors were analyzed and the conclusions were used in injector model calibration. It was verified by experiments that the calibrated injector model achieved ideal simulation accuracy on all working points.

Keywords: electronic controlled injector; model; calibration; DOE

0 引 言

电控喷油器是一个复杂的电磁、液压系统, 也是电控燃油喷射系统中最为关键最为复杂的零部件。基于仿真平台开展电控喷油器的设计与优化成为越来越被普遍采用的方法。由于建模的过程不可避免要进行简化和抽象, 且包含一些不易测量的经验参数设置, 为了保证和检验模型的精度, 标定过程必不可少。本文将试验设计与分析(DOE)的方法用于电控喷油器模型标定中, 标定后的模型在各典型工况下的循环喷油量都达到理想的精度。

1 电控喷油器仿真模型的建立

1.1 研究对象

本文的研究对象是某型船用柴油机电控喷油器, 该电控喷油器头部集成蓄压容积, 结构如图 1 所示。

1.2 仿真模型的搭建

电控喷油器是一个包括容积腔、管路、节流孔、液压阀件等液压部件, 针阀、弹簧等机械运动部件和电磁阀等电磁部件的复杂多维物理场系统。本文采用 AMESim 平台, 根据各组件间的机械和液

表 2 具体水平值数据

水平	A 针阀密封 截面流量系数	B 球阀 流量系数	C 黏性 摩擦系数	D 风阻系数	E 静摩擦力/ N	F 电磁阀球阀 升程/m
1	0.7	0.7	250	250	5	0.000 11
2	0.75	0.75	350	350	10	0.000 115
3	0.8	0.8	500	500	20	0.000 12
4	0.85	0.85	600	600	40	0.000 125
5	0.9	0.9	800	800	60	0.000 13

表 3 正交表及控制目标量计算结果对照（部分）

试验	A	B	C	D	E	F	响应(循环喷油量仿真值)/mm ³		
							<i>q</i> ₁	<i>q</i> ₂	<i>q</i> ₃
1	1	1	1	1	1	1	406.446	989.776	1 745.47
2	1	2	2	2	2	2	439.907	1 016.48	1 777.36
3	1	3	3	3	3	3	454.778	1 050.52	1 822.21
4	1	4	4	4	4	4	475.099	1 083.54	1 862.61
5	1	5	5	5	5	5	469.547	1 144.58	1 934.35
6	2	1	2	3	4	5	422.009	1 051.05	1 826.88
7	2	2	3	4	5	1	397.144	1 093.52	1 878.67
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
21	5	1	5	4	3	2	403.583	1 191.89	2 012.44
22	5	2	1	5	4	3	519.283	1 124.54	1 923.77
23	5	3	2	1	5	4	616.142	1 140.96	1 938.19
24	5	4	3	2	1	5	641.105	1 150.31	1 951.88
25	5	5	4	3	2	1	606.044	1 174.76	1 982.24

2.4 正交试验结果分析

(1) 极差计算

本文采用最常用的极差分析法，并利用 MAT-

LAB 分别编写极差分析和趋势图程序^[3]。极差计
算运行结果如表 4。

表 4 极差计算结果

分析项		A/10 ³	B/10 ³	C/10 ³	D/10 ³	E/10 ³	F/10 ³
<i>q</i> ₁	<i>K</i> 1	2.245 8	2.054 4	2.640 1	2.647 1	2.844 5	2.409 9
	<i>K</i> 2	2.322 6	2.598 9	2.627 6	2.508 9	2.535 8	2.492 0
	<i>K</i> 3	2.517 7	2.544 4	2.536 3	2.810 0	2.455 7	2.491 2
	<i>K</i> 4	2.937 3	2.738 1	2.424 1	2.457 9	2.503 9	2.815 3
	<i>K</i> 5	2.786 2	2.873 7	2.581 4	2.385 6	2.469 6	2.601 1
	极差 <i>R</i> 值×10 ³	138.296 6	163.877 2	43.202	84.875 8	77.765 4	81.085 6
	主次顺序	B > A > D > F > E > C					
	优水平(增)	4 5 1 3 1 4					
<i>q</i> ₂	<i>K</i> 1	5.284 9	5.479 7	5.364 4	5.489 9	5.579 1	5.534 1
	<i>K</i> 2	5.417 8	5.578 2	5.430 5	5.524 2	5.506 5	5.541 4
	<i>K</i> 3	5.551 4	5.543 5	5.533 4	5.610 6	5.525 7	5.537 9
	<i>K</i> 4	5.746 9	5.567 3	5.608 7	5.567 1	5.551 6	5.621 5
	<i>K</i> 5	5.782 5	5.614 8	5.846 4	5.591 5	5.620 3	5.548 4
	极差 <i>R</i> 值×10 ³	99.512 8	27.016 8	96.380 8	24.134 8	22.76	17.466 8
	主次顺序	A > C > B > D > E > F					
	优水平(增)	5 5 5 3 5 4					

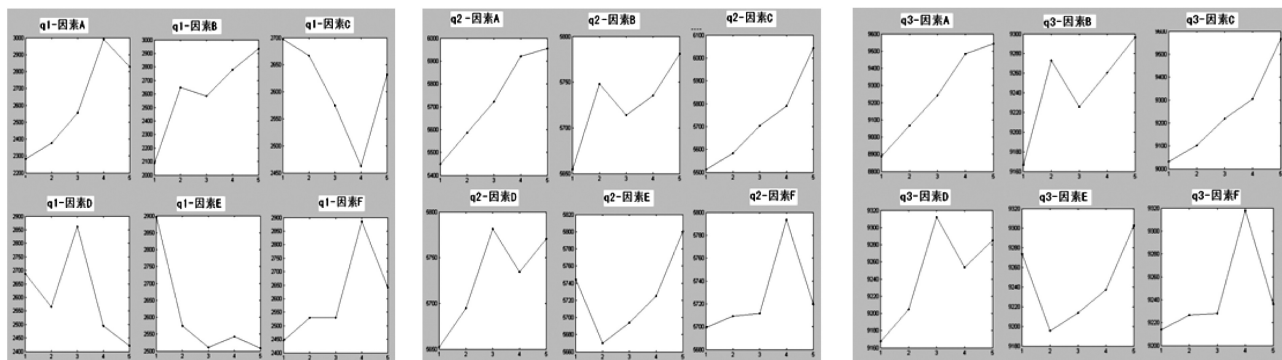
(续表)

q_3	K1	9. 142 0	9. 431 7	9. 257 1	9. 420 4	9. 527 4	9. 479 8
	K2	9. 327 0	9. 535 8	9. 341 1	9. 463 8	9. 446 1	9. 488 9
	K3	9. 502 0	9. 488 4	9. 481 0	9. 570 0	9. 472 9	9. 487 8
	K4	9. 751 6	9. 517 2	9. 579 9	9. 519 4	9. 503 3	9. 582 2
	K5	9. 808 5	9. 557 9	9. 871 8	9. 557 4	9. 581 3	9. 492 4
	极差 R 值 $\times 10^3$	133. 304	25. 246	122. 952	29. 908	27. 032	20. 48
	主次顺序	A > C > D > E > B > F					
	优水平(增)	5 5 5 3 5 4					

以 q_1 为例: K1 行中的 6 个数据, 分别表示因子 A 至 F 在第一水平时所对应的控制目标 q_1 之和。比如, 使得控制因子 A 均处在第一水平的试验共出现 5 次, 试验号分别为 1、2、3、4、5, 其对应的控制目标 q_1 的仿真结果之和为: $406. 446 + 439. 907 + 454. 778 + 475. 099 + 469. 547 = 2\,245. 8$; 类似的, 其余各控制因子 B、C、D、E、F 在第一水平下的 5 次试验控制目标 q_1 之和分别为 2054. 4、2640. 1、2647. 1、

2844. 5 和 2. 4099。依此类推, 可得到表示第二水平下的 K2、K3、K4、K5 各行数据。

为了便于综合分析, 将各控制目标随控制因子水平值变化的情况图形化表示出来, 横坐标为控制因子的 1 到 5 个水平, 纵坐标为所有出现该水平对应的 K 值, 由于 K 值表示的是因子某水平所有组合方案之和, 表示的是该水平的平均效应, 因此该图可反映因子对各响应的趋势性影响。如图 3 所示。

图 3 q —控制因子变化趋势图

(2) 极差计算结果分析^[2]

① 极差 R 值反应了各控制因子水平变动时, 控制目标量的变化幅度。 R 值越大, 说明该控制因子对试验目标量影响越大, 即 R 值的大小可以作为主次因子排序的依据。各控制因子对 q_1 、 q_2 和 q_3 影响的主次排序见表 4。

② K 值反映了各控制目标随控制因子水平值变化的情况, 依据 K 值的大小可选出某个控制因子的优选水平, 如表 4 所示。本文初步设定参数后, 循环喷油量的仿真结果比试验结果小很多, 因此, 以循环喷油量增大方向为优选水平。

③ 由表 4 可知, 各控制因子对低工况点循环喷油量 q_1 均有较大影响, 但中等工况点循环喷油量 q_2 和额定工况点的循环喷油量 q_3 仅相对于针阀密封截面流量系数和黏性摩擦系数较为敏感, 而受其余调节变量影响较小。

3 模型标定结果

由于正交试验只做了部分试验, 不能保证全面试验中的最优组合就在所做的部分试验中, 但是, 利用这些部分试验数据, 可以得到各个因子对控制目标影响的规律性和主次关系, 从而指导标定工作。同时, 本文含有三个控制目标量, 需要综合平衡地分析各控制因子对不同控制目标量的影响。具体为: 可先参照极差计算的优选水平, 完成额定点循环喷油量的标定, 然后根据极差分析计算结果, 选择调节对额定点循环喷油量影响程度较小而对低工况点影响幅度较大的因子, 即因素 B、D、E 和 F, 以此完成低工况点循环喷油量 q_1 的标定。须要说明的是本文中等工况与额定工况点基本保持线性一致, 额定点完成标定后, q_2 已满足要求。各工况点循环喷油量标定结果如表 5 所示。

模型采用上述通过标定确定的调节变量后, 计算结果与试验结果对比如表 6 所示。

表 5 通过标定确定的调节变量

调节变量	数值
针阀密封截面流量系数	0.9
球阀流量系数	0.9
黏性摩擦系数	800
风阻系数	500
静摩擦力/N	5
电磁阀球阀行程/m	0.000 11

表 6 计算结果与试验结果对比

控制目标量	q_1	q_2	q_3
循环喷油量计算值/mm ³	579.31	1 206.3	2 027.13
循环喷油量试验值/mm ³	603.3	1 160	2 060
偏差	3.98%	3.99%	1.757%

额定点循环喷油量偏差在 2% 以内，其他工况点偏差在 4% 以内，可以认为标定工作达到预期效果，标定后的模型可用于后续仿真分析。

4 总 结

本文针对电控喷油器 AMESim 仿真模型的标定

问题，采用试验设计与分析的方法，以 3 个典型工况下的循环喷油量为控制目标，以 6 个不易测量的流量系数、摩擦系数等为控制因子，分析控制目标相对控制因子变动的敏感程度，并排出主次关系，从而指导并完成仿真计算模型的标定。标定后的模型在各工况下的循环喷油量都达到了较为理想的精度。

将正交试验的思想运用到模型标定中，使得标定过程中参数的调整更有指向性，同时也更容易找到多个控制目标量的综合优化方案。

参考文献

[1] 浦卫华,王锋,平涛,等. 电控喷油器关键结构参数正交试验优化设计[J]. 柴油机,2010,32(1):23-26.
[2] 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:72-83.
[3] 王岩,隋思涟. 实验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京:清华大学出版社,2012:159-168.

(上接第 10 页)

从图 5 中可以看出：当蓄压腔容积增大时，空化效应增强，孔内燃油气泡所占体积变大。从速度分布图 6 中可以看出，出口压力较低时，孔内高速燃油占据大部分空间，随着出口处压力的升高，喷孔下游燃油的速度在逐渐变小，不过变化趋势不如体积分数那么明显。

3 结 论

本文利用 CFD 软件对喷嘴内的燃油流动情况进行多维两相流仿真研究，从空间角度对不同的蓄压腔参数对喷嘴内流的影响进行分析，得到如下结论：

- (1) 蓄压腔节流孔截面积和蓄压腔容积对蓄压式喷油器喷嘴内流特性有较大影响。
- (2) 随着节流孔面积的增大，喷孔内气体体积分数增加，孔内空化效应增强；燃油流速降低，出口流量减少。
- (3) 当蓄压腔容积增大时，空化效应增强，孔

内燃油气泡所占体积变大；孔内高速燃油占据大部分空间，喷孔下游燃油的速度在逐渐变小，其变化趋势不如体积分数明显。

参考文献

[1] 谢荣. 船用柴油机电控共轨喷油技术开发的关键技术[J]. 船舶工程,2009(5):17-19.
[2] 何志霞,袁建平. 柴油机喷嘴结构优化的数值模拟分析[J]. 内燃机学报,2006,24(1):35-41.
[3] Masahiko Miyaki,Hideya Fujisawa,Akira Masuda. Development of new electronically controlled fuel injection system ECD-U2 for diesel engines[C]. SAE 91-02-0052.
[4] Payri F,Bermudez V,Payri R,et al. The Influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles[J]. Fuel,2004,83 (4):419-431.
[5] 汪翔,苏万华. 空化过程对柴油喷嘴内流特性的影响[J]. 内燃机学报,2007,25(6)481-487.