

拟因素追加试验设计在发动机性能研究中的应用

贾建章¹ 邵明亮²

(1 华南农业大学工程技术学院, 广州, 510642; 2 吉林工业大学机械科学与工程学院)

摘要 针对发动机性能研究中试验设计的需要, 用拟因素追加法设计了 $7^1 \times 3^2 \times 2^2$ 多因素不等水平的试验方案, 并介绍了其数据处理方法及对因素和试验误差的偏差平方和进行修正的方法, 求出了最佳组合方案.

关键词 试验; 拟因素法; 追加法; 发动机; 性能

中图分类号 U 462.13; O 229

正交试验设计可以大大减少试验次数, 提高试验效率. 在科研和生产实践中, 常常遇到不等水平的多因素试验, 无法用标准正交表安排试验. 为此, 可以改造正交表, 或调整因素水平, 或采用拟因素法等. 在许多情况下, 单独使用上述方法还是无法解决这些问题, 需要综合运用上述设计方法, 才能设计出符合要求的正交表.

笔者在对 492Q 汽油机与汽油辛烷值的匹配研究中, 综合运用拟因素法和追加法, 设计试验方案, 解决了多因素不等水平的试验设计问题, 使试验次数减到了最少.

1 拟因素追加试验的设计

1.1 试验因素和水平

汽油的辛烷值和汽油机的结构参数及使用参数的合理匹配可以提高汽油机的性能. 本文根据实际情况研究压缩比 A 、油门开度 B 、化油器副腔主量孔流量 C (简称流量)、汽油机转速 D 和汽油辛烷值 E 这 5 个因素的合理匹配对汽油机性能的影响. 另外, 还要考察压缩比和汽油辛烷值的交互作用 $A \times E$. 选择发动机的动力性指标有效扭矩 M_e 作为衡量试验效果的指标. M_e 越大越好. 各因素根据实际情况选取的水平如表 1 所示.

表 1 各因素的水平列表

水平	A	B/%	C/(g·min ⁻¹)	D/(r·min ⁻¹)	E
1	7.2	25.0	570	1 000	70
2	7.4	62.5	550	1 500	80
3	7.6	100.0		2 000	
4				2 500	
5				3 000	
6				3 500	
7				4 000	

1.2 试验设计

从1.1可知,本试验是 $7^1 \times 3^2 \times 2^2$ 的5因素不等水平试验,如进行全面试验,需252次,不宜采用.同时,无法采用标准正交表和混合正交表,且单纯应用改造正交表或调整因素与水平法的任何方法也不能满足要求.如选取2水平正交表并采用拟因素法改造,A、B和D因素均须添加一个拟水平值并使A和B共用一个赋闲列,则各因素和交互作用的总自由度数为: $f_0 = (8-1) + [(4-1) \times 2 - 1] + (2-1) \times 2 + (3-1) \times (2-1) = 16$.因此,单独使用拟因素法,须选正交表 $L_{32}(2^{31})$ 进行改造,试验次数为32次.

为了最大可能地减少试验次数,本文选用 $L_{16}(2^{15})$ 正交表,先用并列法使D因素取4水平,再对D因素追加3个水平,就可以使试验次数减少到

表2 表头设计

赋闲列	A	B	C	D	E	A×E	空列
1	2 3	4 5	6	7 8 15	9	10 11	12 13 14

28次.同时,用拟因素法对上述正交表进行改造,得到3水平的2列,用以安排因素A和B.表头设计如表2所示,试验方案见表3.在表2中,A和B共用1个赋闲列1.在表3中,第16行以后为追加试验.在对因素D追加水平时,代换水平为水平1.

表3 试验方案及试验结果¹⁾

序号	赋闲列	A	B	C	D	E	A×E		空列			试验结果	
							10	11	12	13	14	$M_e/(N \cdot m)$	$y_i/(N \cdot m)$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	116.6	-13.4
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	122.5	-7.5
3	1	1	2	2	3	1	1	1	2	2	2	140.4	10.4
4	1	1	2	2	4	2	2	2	1	1	1	135.6	5.6
5	1	2	1	2	3	1	2	2	1	1	2	105.5	-24.5
6	1	2	1	2	4	2	1	1	2	2	1	104.1	-25.9
7	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	145.9	15.9
8	1	2	2	1	2	2	1	1	1	1	2	153.8	23.8
9	2	2	2	1	3	2	1	2	1	2	1	157.6	27.6
10	2	2	2	1	4	1	2	1	2	1	2	148.3	18.3
11	2	2	3	2	1	2	1	2	2	1	2	152.3	22.3
12	2	2	3	2	2	1	2	1	1	2	1	153.6	23.6
13	2	3	2	2	1	2	2	1	1	2	2	145.7	15.7
14	2	3	2	2	2	1	1	2	2	1	1	120.1	-9.9
15	2	3	3	1	3	2	2	1	2	1	1	175.3	45.3
16	2	3	3	1	4	1	1	2	1	2	2	136.9	6.9
17	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	108.2	-21.8
18	1	2	2	1	5	1	2	2	2	2	1	141.2	11.2
19	2	2	3	2	5	2	1	2	2	1	2	143.6	13.6
20	2	3	2	2	5	2	2	1	1	2	2	138.2	8.2
21	1	1	1	1	6	1	1	1	1	1	1	95.8	-34.2
22	1	2	2	1	6	1	2	2	2	2	1	127.6	-2.4
23	2	2	3	2	6	2	1	2	2	1	2	131.5	1.5
24	2	3	2	2	6	2	2	1	1	2	2	124.8	-5.2
25	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	80.9	-49.1
26	1	2	2	1	7	1	2	2	2	2	1	112.6	-17.4
27	2	2	3	2	7	2	1	2	2	1	2	116.5	-13.5
28	2	3	2	2	7	2	2	1	1	2	2	109.8	-20.2

1)表中的 y_i 为实测的扭矩 M_e 减去 130 N·m 后的值,即: $y_i = M_e - 130$

2 结果与分析

2.1 方差分析

按上述方案实施试验,结果见表3。在本方案中, D 因素的基本水平数 b_{D_0} 为4,追加水平数 q 为3,因此,基本表和追加表的试验次数总和 N 及实际试验次数 R 分别为(任露泉,1987):

$$N = (q + 1)a = (3 + 1) = 64, \quad (1)$$

$$R = (1 + q/b_{D_0})a = (1 + 3/4) \times 16 = 28. \quad (2)$$

总的偏差平方和 S 和总自由度 f 分别为:

$$S = \sum_{i=1}^R \lambda_i y_i^2 - T_c = 28\,799.3, \quad (3)$$

$$f = R - 1 = 27, \quad (4)$$

式中, λ_i 为系数,当 i 水平为代换水平和追加水平时, $\lambda_i = 1$;而当 i 水平为非代换水平时, $\lambda_i = q + 1 = 4$, T_c 为修正项(栾军,1986),

$$T_c = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^R \lambda_i y_i)^2. \quad (5)$$

追加水平列 D 的偏差平方和及其自由度分别为:

$$S_D = \frac{b_{D_0} \sum_{i=1}^{b_D} K_{iD}^2}{a \lambda_i} - T_c, \quad (6)$$

$$f_D = b_D - 1 = 6, \quad (7)$$

式中, K_{iD} 为在 N 次试验中 D 因素第 i 个水平的指标和, b_D 和 b_{D_0} 分别是 D 因素的水平数和在本正交表中的水平数, $b_D = 7$, $b_{D_0} = 4$.

其它2水平列的偏差平方和可按式计算:

$$S_j = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^2 K_{ij}^2 - T_c, \quad j = 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, \quad (8)$$

式中, K_{ij} 为在 N 次试验中第 j 列第 i 个水平的指标和.

拟因素 A 和 B 的偏差平方和及其自由度分别为:

$$S_A = S_2 + S_3, \quad (9)$$

$$S_B = S_4 + S_5, \quad (10)$$

$$f_A = f_B = 2. \quad (11)$$

因素 C 、 E 和交互作用 $A \times E$ 的偏差平方和及自由度分别为:

$$S_C = S_6, S_E = S_9, S_{A \times E} = S_{10} + S_{11}, \quad (12)$$

$$f_C = f_E = 1, f_{A \times E} = 2. \quad (13)$$

2.2 误差分析

试验误差偏差平方和及其自由度为:

$$S_{e1} = S - S_1 - S_A - S_B - S_C - S_D - S_E - S_{A \times E}, \quad (14)$$

$$f_e = f - f_1 - f_A - f_B - f_C - f_D - f_E - f_{A \times E} = 12. \quad (15)$$

由于是追加试验,存在追加试验误差,使 S_e 和 S_j 包含的试验误差不一致,因此,各偏差平方和需分别乘上修正系数 K_c 和 K_j (任露泉,1987):

$$K_j = f_j / \{ [(3a - R)/a] (b - 1) + q \}, \quad (16)$$

$$K_e = f_e / [2a - (3a - R)/a - \sum_{j=1}^6 (f_j / K_j)]. \tag{17}$$

于是,试验误差和各列的平均偏差平方和及 F 值成为:

$$V_e = S_{e1} K_e / f_e, \tag{18}$$

$$V_j = S_j K_j / f_j, \tag{19}$$

$$F_j = V_j / V_e. \tag{20}$$

综合上述公式,可以列出方差分析表(表4),进行显著性检验.由表4中可知,上述因素均很显著.由各因素的平均偏差平方和可知各因素对动力性影响的主次顺序为(主→次): B 、 D 、 C 、 $A \times E$ 、 E 、 A .

表4 方差分析表¹⁾

方差来源	S_j	f_j	K_j	V_j	F_j	a_j
A	569.7	2	8/15	151.9	10.7	0.01
B	9406.6	2	8/15	2508.4	175.9	0.01
C	2585.6	1	4/15	689.5	48.4	0.01
D	6463.2	6	8/9	957.5	67.1	0.01
E	1500.9	1	4/15	400.3	28.1	0.01
$A \times E$	1586.6	2	8/15	423.1	29.7	0.01
赋闲列1	6665.3	1				
试验误差	21.4	12	8	14.26		

1) $F_{0.01}(2,12) = 6.93, F_{0.01}(1,12) = 9.33, F_{0.01}(6,12) = 4.82$

2.3 最优组合分析

为了确定各个因素的最优取值,要对该因素各水平的指标平均值进行比较.表5列出了各因素水平的指标平均值.表中, \bar{K}_{ij} 表示第 j 个因素第 i 个水平的指标(γ_i)的平均值,其计算方法参见栾军(1986).由于要求发动机的扭矩越大越好,因此, \bar{K}_{ij} 越大的水平越好.下面分析各个因素的最优水平.

(1)油门开度 B 、流量 C 和转速 D :这些因素没有交互作用或很小,因此,根据其指标平均值就可以确定其最优值.从表5可以看出,油门开度 B 的3水平,流量 C 的1水平,转速 D 的3水平为最优水平,此时,扭矩最大.

表5 各因素水平的指标平均值

指标	A	B	C	D	E
\bar{K}_{1j}	-5.3	-21.9	10.8	10.1	-0.4
\bar{K}_{2j}	6.3	9.7	-1.9	7.5	9.3
\bar{K}_{3j}	10.5	20.4		14.7	
\bar{K}_{4j}				1.2	
\bar{K}_{5j}				2.8	
\bar{K}_{6j}				-10.1	
\bar{K}_{7j}				-25.1	

(2)压缩比 A 和辛烷值 E :这两者的交互作用 $A \times E$ 较强,要分析它们的各种组合的指标平均值,才能找出最优组合.各种组合下的指标平均值(见表6)可以看出,当压缩比取第3水平且汽油辛烷值取第2水平时,发动机的平均扭矩最大,因此,它们是最优水平.

表6 压缩比和辛烷值在各种组合下的指标平均值

压缩比水平	辛烷值水平	
	1	2
1	-9.62	-0.95
2	4.81	7.87
3	-1.50	22.46

综合上述可知,从获得最大扭矩的角度来说,压缩比 A 、油门开度 B 、流量 C 、转速 D 和辛烷值 E 的最优水平分别为3、3、1、3和2,即最优组合是: $A_3 B_3 C_1 D_3 E_2$.不过,根据对燃油耗率的分析,从经济的角度来说,油门开度取2水平更好一些.

3 结论

(1)科研和生产中的不等水平多因素试验往往需要综合利用改造正交表和调整因素与水平法的多种方法.本文提出的拟因素追加法可以为解决这类问题提供参考.

(2)在处理拟因素追加法的试验数据时,要对各因素偏差平方和及试验误差偏差平方和予以修正.

参 考 文 献

栾 军.1986.试验设计的技术与方法.北京:上海交通大学出版,64~69

任露泉.1987.试验优化技术.北京:机械工业出版社,59~60

Application of Design of the Dummy Factor and Additional Experiment in the Study of the Engine Characteristics

Jia Jianzhang¹ Shao Mingliang²

(1 College of Polytechnic, South China Agric. Univ., Guangzhou, 510642;

2 College of Mechanical Science and Engineering, Jilin Univ. of Tech.)

Abstract In this thesis, the design of a dummy factor and additional experiment $7^1 \times 3^2 \times 2^2$ was designed and carried out to study engine performance. In addition, the method to process the experimental data was discussed.

Key words experiment; dummy factor design; additional design; engine; performance

【责任编辑 柴 焰】

欢迎订阅一九九九年《华南农业大学学报》

《华南农业大学学报》是华南农业大学主办的综合性农业科学学术刊物.本刊主要报道我校各学校的科研学术论文、研究简报、文献综述等.本刊附英文目录和英文摘要.读者对象是农业院校师生、农业科研人员和有关部门的专业干部.

本刊为中国科学引文数据库固定刊源,并排列在被引频次最高的中国科技期刊500名以内.被《中文核心期刊要目总览》确认为综合性农业科学核心期刊、植物保护类核心期刊.为国内外多家文摘的固定刊源.

国内外公开发行、季刊.每期126页,定价5.00,全年20.00元、自办发行,参加高等学校学报联合征订发行.

订阅办法:1.将订阅款邮汇至:100054北京右安门外首都医科学期刊社;2.银行汇款至:户名:首都医科学期刊社;开户银行:工商银行北京宣武支行樱桃园分理处,帐号:144659-713;3.订阅款邮汇至:510642广州五山华南农业大学学报编辑部.

《华南农业大学学报》编委会